

Turbulenzentstehung in kompressiblen Grenzschichtströmungen

Oertel, Herbert

Veröffentlicht in:
Jahrbuch 1995 der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.131-141



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

HERBERT OERTEL, Karlsruhe

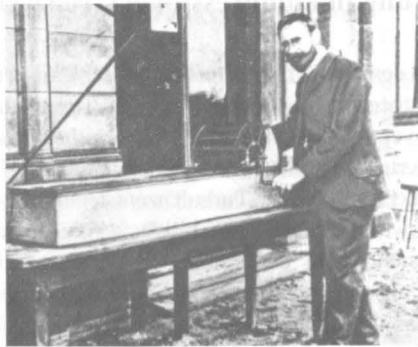
Turbulenzentstehung in kompressiblen Grenzschichtströmungen

Der Vortrag zu Ehren des diesjährigen Preisträgers der Carl-Friedrich-Gauß-Medaille behandelt die stabilitätstheoretischen Grundlagen der Turbulenzentstehung in Grenzschichtströmungen. Wir verzichten dabei auf jegliche mathematischen Ableitungen und verweisen den interessierten Leser auf unsere Fachliteratur [1–7]. Der Artikel beginnt mit den klassischen Erkenntnissen zur Turbulenzentstehung in einer inkompressiblen Plattengrenzschicht. Es werden dann die Stabilitätstheorie und die verschiedenen Stadien der Turbulenzentstehung in der kompressiblen Grenzschicht erläutert. Dabei werden die Begriffe der absoluten und konvektiven Instabilität eingeführt, die letztendlich die Grundlage für das Verständnis des laminar-turbulenten Übergangs in der dreidimensionalen Grenzschicht eines transsonischen Tragflügels für Verkehrsflugzeuge eröffnen.

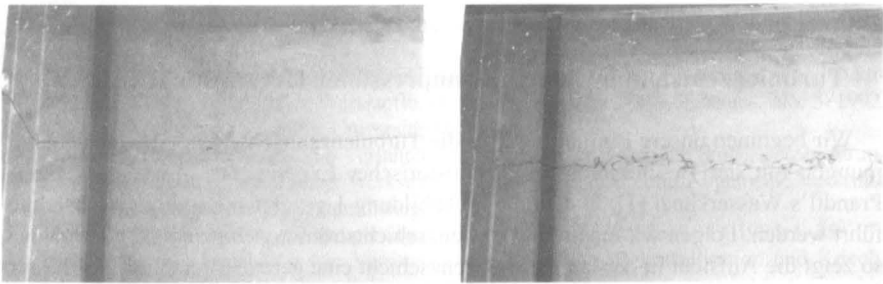
Turbulenzentstehung in der inkompressiblen Grenzschichtströmung

Wir beginnen unsere Einführung über die Turbulenzentstehung in Grenzschichtströmungen mit der Beschreibung einiger historischer Experimente. Ausgangspunkt ist Prandtl's Wasserkanal [1], in dem die in Abbildung 1 gezeigten Experimente durchgeführt werden. Folgen wir einem in die Grenzschichtströmung eingebrachten Farbfaden, so zeigt die Aufsicht in der laminaren Grenzschicht eine gerade Streichlinie. In der turbulenten Grenzschichtströmung beobachten wir eine Durchmischung des Farbfadens aufgrund des zusätzlichen turbulenten Querimpulsaustausches. Dieses berühmte Experiment hat Reynolds veranlaßt, für die mathematische Beschreibung einen Ansatz, bestehend aus der zeitgleich gemittelten Grundströmung und den turbulenten Schwankungsgrößen, zu wählen. Dieser Reynoldssche Ansatz führt letztendlich zu den Reynoldsgemittelten Navier-Stokes-Gleichungen für die inkompressible turbulente Strömung und zu den Favre-gemittelten Grundgleichungen für die kompressible turbulente Strömung. Prandtl's Grenzschichttheorie [1] führt diese zeitlich- bzw. massengemittelten Grundgleichungen in die entsprechenden Grenzschichtgleichungen für turbulente Grenzschichtströmungen über [5, 6].

Damit haben wir mit wenigen Worten den Weg zur Berechnung turbulenter Grenzschichtströmungen skizziert. Dabei haben wir aber noch nichts über die Einzelheiten der Turbulenzentstehung in der Grenzschicht gelernt. Dazu betrachten wir die Prinzipskizze der Abbildung 2. Der laminar-turbulente Übergang setzt in der Plattengrenzschicht mit zweidimensionalen Tollmien-Schlichting-Wellen (TS) ein, die mit einer bestimmten Phasengeschwindigkeit stromab wandern. Dabei werden aufgrund sekundärer Instabilitäten dreidimensionale Störungen überlagert, die zu sogenannten λ -Wirbeln führen, in deren Spitzen sich über Turbulenzflecken der Übergang zur turbulenten Grenzschichtströmung vollzieht.



L. Prandtl's Wasserkanal [1]



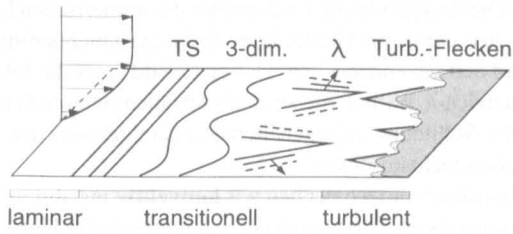
Farbfäden in der laminaren und turbulenten Grenzschichtströmung

Abb. 1:

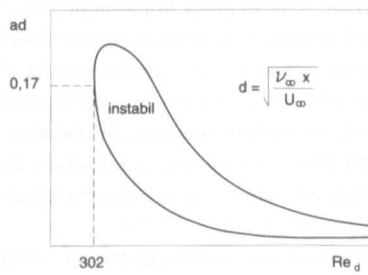
Experimente zum laminar-turbulenten Übergang in einer Grenzschichtströmung

Das Einsetzen der Tollmien-Schlichting-Instabilität läßt sich mit der klassischen Orr-Sommerfeld-Stabilitätsanalyse für harmonische Wellen berechnen [5, 7]. Das Stabilitätsdiagramm zeigt die dimensionslose Wellenzahl in Abhängigkeit der für die Instabilität charakteristischen dimensionslosen Kennzahl Re_d (Verhältnis Trägheit zur Reibung). Innerhalb des gekennzeichneten Stabilitätsbereiches sind harmonische Störwellen instabil. Bewegen wir uns mit der Längskoordinate x stromab, so treffen wir die Neutralkurve des Stabilitätsdiagramms mit wachsender Reynoldszahl bei dem kritischen Wert 302. Dazu gehört die kritische Wellenzahl der harmonischen Störwelle von 0.17. Stromab sind in dem gekennzeichneten Wellenzahlbereich die Störwellen instabil und leiten den Übergang zur turbulenten Grenzschichtströmung ein.

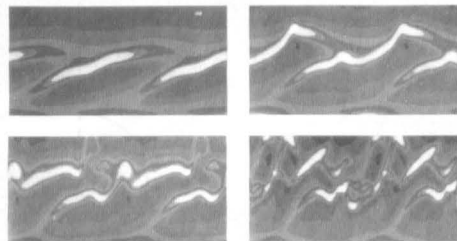
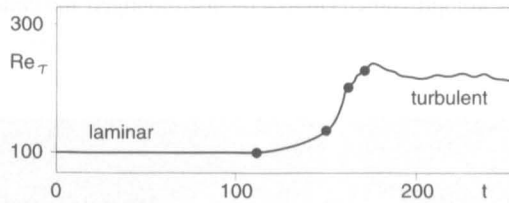
Die einzelnen Stadien des nichtlinearen Transitionsprozesses im instabilen Bereich diskutieren wir anhand einer numerischen Lösung [7]. In Abhängigkeit der numerischen Simulationszeit, die der Koordinate x stromab entspricht, ist die dimensionslose Wandschubspannung aufgetragen. Im laminaren Bereich der Grenzschicht berechnen wir einen konstanten Wert. Im Übergangsbereich steigt die Wandschubspannung und damit



Prinzipische Skizze des laminar-turbulenten Übergangs in der Platten-Grenzschichtströmung



Stabilitätsdiagramm



Dimensionslose Wandschubspannung und lokale Scherschichten im Mittelschnitt der Grenzschicht

Abb. 2:
Turbulenzentstehung in einer inkompressiblen Grenzschichtströmung

der Widerstand an. Die dazugehörigen Einzelbilder der numerischen Lösung zeigen eine Komponente des Schervektors im Mittelschnitt der Grenzschichtströmung. Die Bereiche hoher Scherung sind hell gekennzeichnet. Das erste Bild zeigt die lokalen Scherschichten der sich ausbildenden λ -Wirbel, die stromab zerfallen. Dieser Zerfallsprozeß, der in den Einzelbildern der Abbildung 2 festgehalten ist, charakterisiert den Transitionsprozeß zur turbulenten Grenzschichtströmung.

Einen solchen Transitionsprozeß nennen wir **konvektiv** instabil im Gegensatz zu **absolut** instabilen Strömungsbereichen, in denen ein momentaner Umschlag zur turbulenten Strömung stattfindet. Dies sind zwei neue Begriffe, die für die weitere Diskussion der Turbulenzentstehung von entscheidender Bedeutung sein werden. Die Abbildung 3 veranschaulicht die Begriffsbildung in einer horizontalen Ebene der Grenzschichtströmung. Im konvektiv instabilen Strömungsbereich werden lokal eingebrachte Störungen stromab geschwemmt und beeinflussen mit fortschreitender Zeit nicht den ursprünglichen Ort der Störung (Plattengrenzschicht). Im absolut instabilen Strömungsbereich beeinflussen lokal eingebrachte Störungen mit fortschreitender Zeit den gesamten Strömungsbereich. Dies führt zu einem schlagartigen Einsetzen der Turbulenz, den wir bei der Diskussion der Turbulenzentstehung in dreidimensionalen kompressiblen Grenzschichtströmungen kennenlernen werden.

Für das Auffinden konvektiver und absolut instabiler Strömungsbereiche haben wir eine neue Theorie lokaler Störungen entwickelt, die die klassische Orr-Sommerfeld Stabilitätsanalyse harmonischer Wellen ablöst. Die Theorie lokaler Störungen werden wir im folgenden auf die kompressiblen Grenzschichtströmungen anwenden [2, 3].

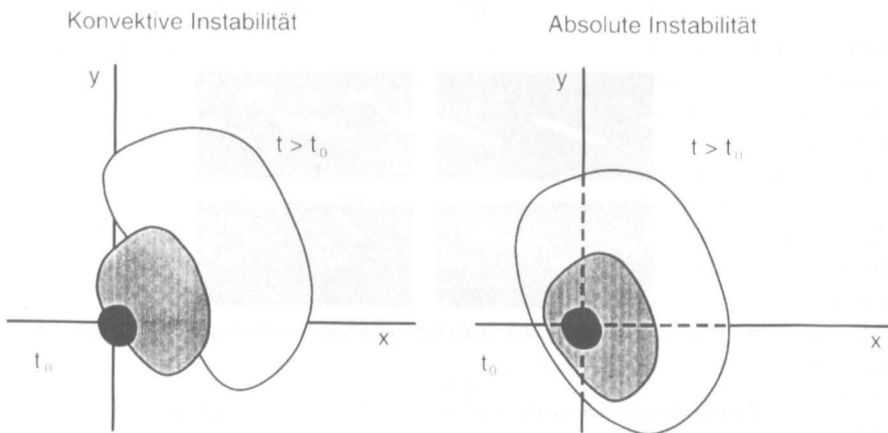
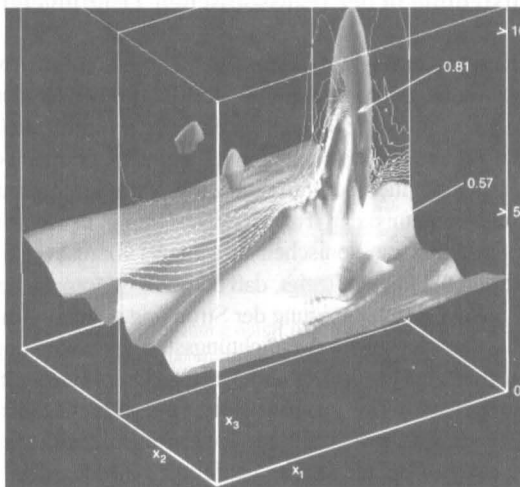
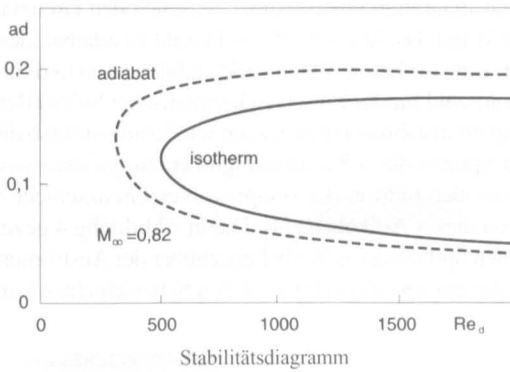
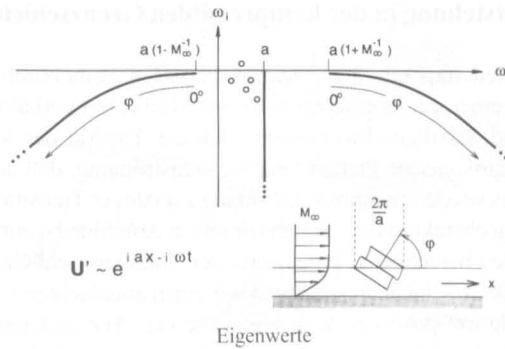


Abb. 3:
Konvektive und absolute Instabilität



Isomachlinien im Transitionsbereich

Abb. 4:
Turbulenzentstehung in einer kompressiblen Grenzschichtströmung

Turbulenzentstehung in der kompressiblen Grenzschichtströmung

Wir beginnen wiederum mit der zweidimensionalen kompressiblen Plattengrenzschichtströmung bei einer transsonischen Anström-Machzahl (Verhältnis von Anströmgeschwindigkeit und Schallgeschwindigkeit). Unsere Theorie der lokalen Störungen zeigt auch für die transsonische Platten-Grenzschichtströmung, daß diese konvektiv instabil ist. Damit ist es wiederum ein zur Abbildung 2 analoger Transitionsprozeß, der die Turbulenzentstehung charakterisiert. Sehen wir uns in Abbildung 4 zunächst die mit harmonischen Störwellen berechneten Eigenwerte der Tollmien-Schlichting-Instabilität in der kompressiblen Grenzschicht an, erkennen wir einen angefachten Eigenwert (Tollmien-Schlichting-Welle mit positiver Anfachsungsrate ω_i). Alle anderen viskosen Eigenwerte einschließlich der akustischen Wellen sind bei transsonischen Machzahlen gedämpft. Das Stabilitätsdiagramm unterscheidet zwischen den Grenzfällen einer adiabaten bzw. isothermen Wand. Die kritische Reynoldszahl ist adiabat identisch mit dem inkompressiblen Wert. Eine isotherme Wand wirkt stabilisierend und führt zu einer größeren kritischen Reynoldszahl für das Einsetzen harmonischer Störwellen. Die numerische Simulationsrechnung im instabilen Bereich zeigt wiederum stromab die Ausbildung von λ -Wirbeln, in deren Spitzen die Schwankungsgrößen am größten sind. Diese Schwankung der Strömungsgrößen führt in der kompressiblen Grenzschicht zur Schallabstrahlung, die nicht Thema dieses Artikels ist [4]. Die in Abbildung 4 gezeigten Isomachflächen zeigen, daß in den Spitzen der λ -Wirbel gegenüber der Anströmung Übergeschwindigkeiten auftreten, die mit dem Zerfall der lokalen Scherschichten korreliert sind.

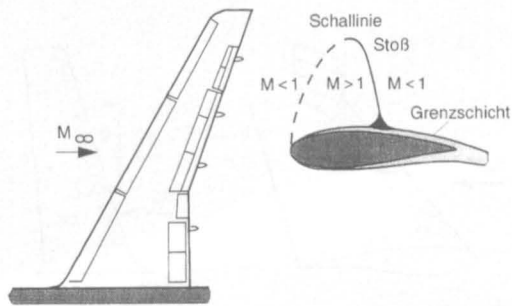
Turbulenzentstehung in der transsonischen Tragflügelgrenzschicht

Das besondere Interesse an der Turbulenzentstehung in dreidimensionalen kompressiblen Grenzschichtströmungen kommt aus der Luftfahrt. Hier werden derzeit Studien über zukünftige Großraumflugzeuge ausgearbeitet. Da eine turbulente Grenzschichtströmung einen größeren Widerstand als eine laminare aufweist, ist man bestrebt, die Technologie der Laminarisierung auch bei transsonischen Verkehrsflugzeugen einzusetzen. Dies setzt jedoch die Kenntnis der Turbulenzentstehung in der dreidimensionalen Grenzschicht eines gepfeilten transsonischen Tragflügels voraus.

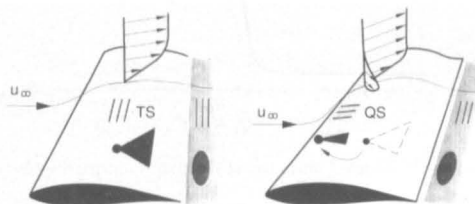
Die Prinzipskizze der Abbildung 5 zeigt, daß bei einer transsonischen Anströmmachzahl von 0.82 aufgrund der Beschleunigung der Strömung auf dem Tragflügel ein Überschallgebiet entsteht, das von einem Verdichtungsstoß (Drucksprung) abgeschlossen wird. Dieser erzeugt zusätzlichen Widerstand. Um den Drucksprung und damit die Widerstandserhöhung möglichst gering zu halten, ist man zu gepfeilten Tragflügeln übergegangen, die die lokale Anströmmachzahl am Profil entsprechend der freien Anströmmachzahl reduzieren. Der Nachteil dieser gepfeilten Tragflügel ist jedoch, daß die Grenzschichtströmung auf dem Tragflügel dreidimensional wird, was bezüglich unseres Themas seine Auswirkung hat. Aufgrund der Pfeilung des Tragflügels tritt in der dreidimensionalen Grenzschicht oberhalb eines kritischen Pfeilwinkels eine weitere Instabili-

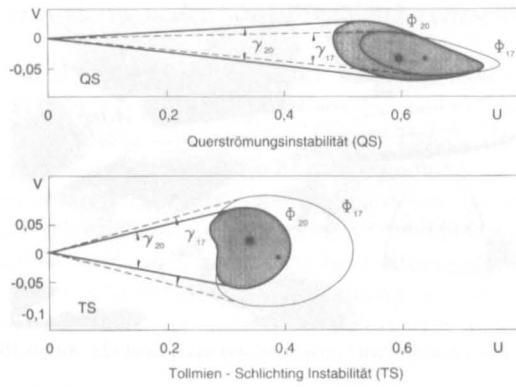


Studie eines zukünftigen Großraumflugzeuges, Deutsche Airbus 1994

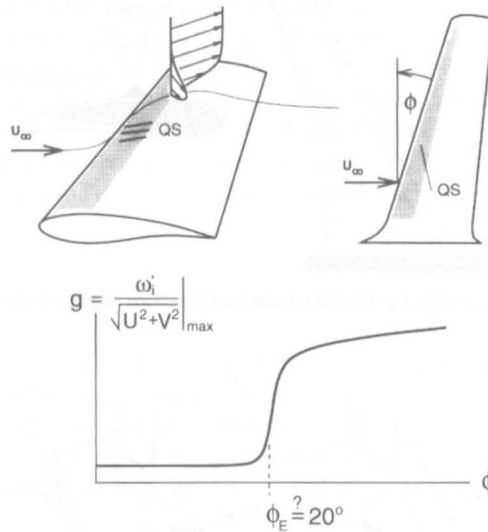


Prinzipskizze des transsonischen Tragflügels

Turbulenzentstehung durch Tollmien-Schichten (TS)
und Querströmungsinstabilitäten (QS)
auf dem transsonischen TragflügelAbb. 5:
Transsonischer Tragflügel eines Verkehrsflugzeuges



Instabile Bereiche auf dem Tragflügel



Kritischer Pfeilwinkel eines transsonischen Laminarflügels

Abb. 6:
Ein Auslegungskriterium für den transsonischen Laminarflügel

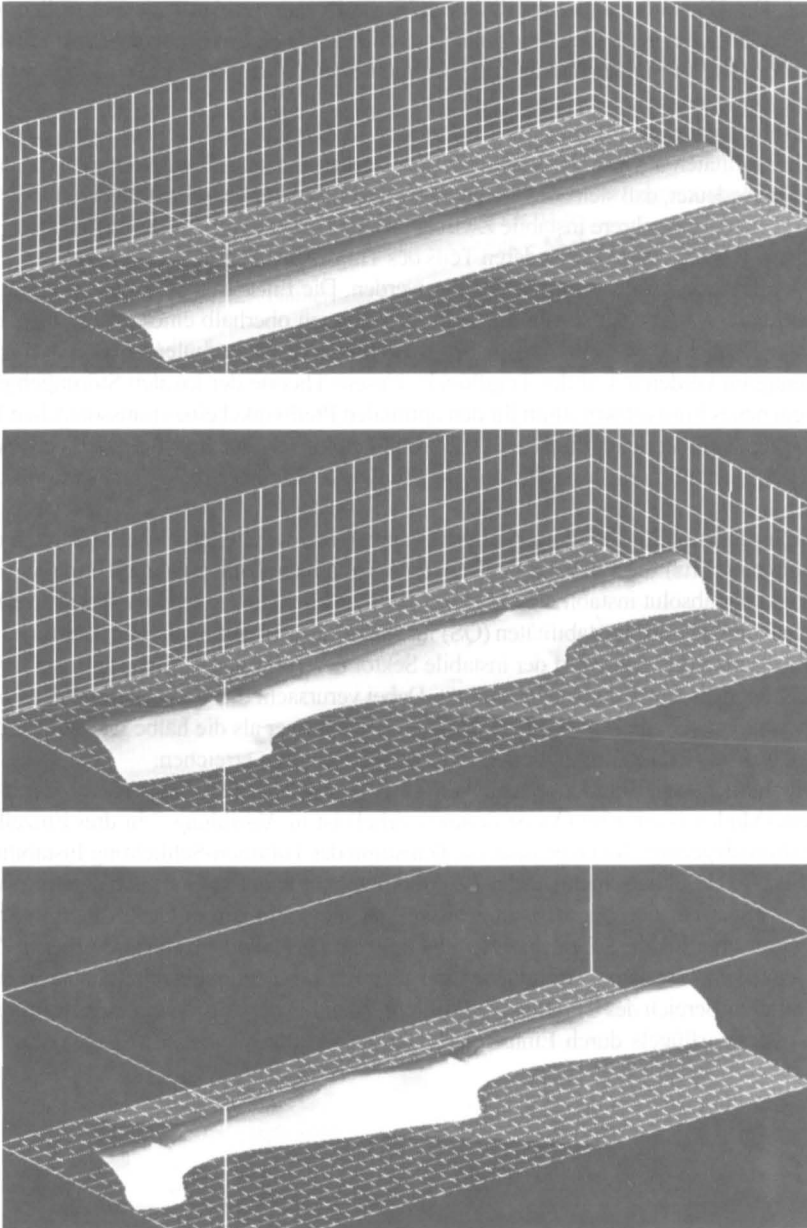


Abb. 7:
*Zerfall der Querströmungswirbel (0-Hertz-Mode der Querströmungsinstabilität)
in der Tragflügel-Grenzschichtströmung*

tät auf. Die Querströmungsinstabilitäten (QS) sind wiederum laufende Störwellen, die sich jetzt längs des gepfeilten Tragflügels mit charakteristischen Phasengeschwindigkeiten ausbreiten und ergänzend zu den Tollmien-Schlichting-Wellen den Übergang zur turbulenten Grenzschichtströmung einleiten.

Unsere Theorie der Wellenpaket-Störungen [2, 3] zeigt, daß die Tollmien-Schlichting-Instabilitäten auch in der kompressiblen Grenzschichtströmung konvektiv instabil sind. Das bedeutet, daß sich der Übergang zur turbulenten Grenzschicht in einem Transitionsbereich über mehrere instabile Zwischenstadien vollzieht. Diese können durch eine geeignete Konturierung des vorderen Teils des Tragflügels zumindest bis zum Auftreten des Verdichtungsstoßes stromab gedrängt werden. Die Entstehung der Querströmungsinstabilitäten ist dagegen absolut instabil. Diese setzen oberhalb eines kritischen Pfeilwinkels schlagartig ein und verursachen den Umschlag zur turbulenten Grenzschichtströmung im vorderen Teil des Tragflügels. Unsere Theorie der lokalen Störungen gibt also ein neues Entwurfskriterium für den optimalen Pfeilwinkel eines transsonischen Laminarflügels für Verkehrsflugzeuge. Die Abbildung 6 weist nach, daß für die Verhinderung der Querströmungsinstabilitäten ein Pfeilwinkel kleiner als 20° realisiert werden muß.

Ergänzend sind in Abbildung 6 in der Gruppengeschwindigkeits-Ebene (Bereich des Energietransports) die Bereiche der konvektiv instabilen Tollmien-Schlichting-Wellen (TS) und der absolut instabil einsetzenden, stromab aber auch konvektiv instabil zerfallenden Querströmungsinstabilitäten (QS) für zwei Pfeilwinkel eingetragen. Beim kleineren Pfeilwinkel 17° dominiert der instabile Sektor der Tollmien-Schlichting-Instabilität, bei 20° der der Querströmungsinstabilität. Dabei verursacht die Vergrößerung des Pfeilwinkels um nur 3° , daß ein Wellenpaket nur noch weniger als die halbe Laufstrecke benötigt, um die gleiche Amplitudenvergrößerung stromab zu erreichen.

Die numerische Simulation des konvektiv instabilen Zerfallsprozesses der sog. 0-Hertz-Moden (stationäre Querströmungswirbel) ist in Abbildung 7 in drei Einzelbildern stromab gezeigt. Im Gegensatz zur Transition der Tollmien-Schlichting Instabilität, die über lokale Scherschichten und λ -Wirbeln zur turbulenten Grenzschichtströmung führt, werden bei der Querströmungsinstabilität die stationären Querströmungswirbel wiederum über lokale Scherschichten unterteilt und zerfallen stromab. Da dieser Zerfallsprozeß und der damit verbundene Übergang zur turbulenten Grenzschichtströmung im vorderen Bereich des Tragflügels geschieht, ist er bei der Auslegung eines transsonischen Laminarflügels durch Einhalten des kritischen Pfeilwinkels (20°) unbedingt zu vermeiden.

Ergänzende Literatur:

- [1] Prandtl, L.: Über Flüssigkeitsbewegungen bei sehr kleiner Reibung. Gesammelte Abhandlungen. Springer, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 575–584, 1961.
- [2] Oertel jr., H.: Bereiche der reibungsbehafteten Strömung. Z. f. Flugwiss. 19 (1995) 119–128.
- [3] Oertel jr., H.; Delfs, J.: Mathematische Analyse der Bereiche reibungsbehafteter Strömungen. ZAMM, Z. angew. Math. Mech. 75 (1995) 7, 491–505.
- [4] Delfs, J.: Numerische Simulation der transitionellen schallnahen Plattengrenzschichtströmung. Techn. Universität Braunschweig, Dissertation 1994, ZLR 94-05.
- [5] Oertel, jr., H.; Böhle, M.; Ehret, T.: Strömungsmechanik – Methoden und Phänomene. Springer, Berlin/Heidelberg, 1995.
- [6] Oertel jr., H.; Laurien, E.: Numerische Strömungsmechanik. Springer, Berlin/Heidelberg 1995.
- [7] Oertel jr., H.; Delfs, J.: Strömungsmechanische Instabilitäten. Springer, Berlin/Heidelberg 1996.

Prof. Dr.-Ing. habil. H. Oertel jr.
Institut für Strömungslehre und Strömungsmaschinen der Universität Karlsruhe
Kaiserstraße 12 · 76128 Karlsruhe